MÉTODOS MODERNOS EN ESTUDIOS SISTEMÁTICOS

Otto T. Solbrig

LA sistemática tiene su origen en la necesidad humana de producir un sistema de comunicación. Históricamente, en sus principios, la sistemática biológica puede considerarse como una rama del lenguaje: su objetivo, el nombrar y definir los objetos con vida. Pero desde un principio aun en el mundo primitivo, los diferentes tipos de plantas y animales deben haber producido problemas de definición e identificación al hombre, dado que los organismos se presentan, existen en más variedades y formas que los objetos inanimados, y además es de importancia fundamental poder reconocer la diferencia entre una planta comestible y una que es venenosa, o entre una serpiente y una culebra inofensiva. Con el tiempo, el mago o sabio que tenía la habilidad de poder reconocer la diferencia entre *Amanita muscaria* y *Agaricus campestris* se debe haber preguntado "por qué ciertas especies son parecidas y otras no", y en esa pregunta la sistemática científica tiene su origen.

Hacia mediados del Siglo 18 la taxonomía vegetal y animal había adquirido una metodología y un contenido conceptual que ha persistido hasta hoy. Los problemas que se trata de resolver son básicamente dos: 1), la descripción, clasificación y nomenclatura de todas las especies de organismos, y 2), la formulación de una teoría para explicar el número, diversidad y origen de las diferentes especies. Las técnicas en uso son la observación y descripción de los caracteres morfológicos de las especies en todos los estados del ciclo vital, y luego la agrupación de los individuos semejantes en especies sobre la base de la posesión de caracteres comunes usando una lógica escolástica aristotélica y la agrupación de las especies en categorías superiores, géneros, familias, etc., usando el mismo método. Este sistema es eminentemente práctico y eficiente para la descripción y nomenclatura de especies vegetales y animales y ha persistido con pocas modificaciones hasta nuestros días; la principal modificación es el abandono de una lógica aristotélica pura en la creación de categorías superiores, reemplazada por una lógica más moderna basada en el "set theory", o sea la lógica de grupos.

Por otro lado, si bien los métodos del Siglo 18 han probado ser útiles en el Siglo 20, las explicaciones del Siglo 18 respecto a la diversidad de organismos, probaron ser incorrectas. Como es bien sabido, la explicación del número y diversidad de organismos aceptada hoy en día es la teoría de la evolución por selección natural presentada por Charles Darwin en 1859. La teoría de Darwin produjo una explicación nueva a un problema antiquísimo, que es: ¿por qué hay tantas especies de organismos y por qué algunos son más parecidos que otros? Las observaciones en que se basó

Darwin para producir su teoría y la metodología usada por él no eran nuevas; sólo la *interpretación* de esas observaciones lo es, puesto que a mediados del Siglo 19 la sistemática estaba basada casi exclusivamente en la morfología y la anatomía. La teoría de la evolución por selección natural, consecuentemente, no alteró la metodología de la sistemática biológica, o los resultados de los estudios taxonómicos anteriores a Darwin. Solamente cuando los evolucionistas comenzaron a deducir ciertas conclusiones nuevas y empezaron a hacer predicciones basadas en la teoría de la evolución, se inició un cambio en el tenor de los estudios sistemáticos. Así, por ejemplo, uno de los aspectos más importantes de la teoría de la evolución es la idea de que diversos genotipos producen progenies que difieren en número y adaptabilidad. Pero en el tiempo de Darwin existía una gran ignorancia con respecto a las leyes genéticas. Sólo después de los descubrimientos de Mendel fue posible hacer predicciones genéticas con implicaciones evolucionistas y sistemáticas.

Las ideas de Darwin han tenido un gran impacto en el concepto de la especie. El Darvinismo ha producido dos principios de importantes consecuencias sistemáticas: 1), la tesis de que especies similares descienden, con modificación, de antepasados comunes, y 2), el concepto de que la unidad evolutiva no es el individuo sino la población.

El concepto de descendencia con modificación implica que el proceso de la herencia es de importancia crucial en la evolución de especies. No es sorprendente, por lo tanto, encontrar que las técnicas genéticas tienen un papel muy importante en la sistemática moderna. El concepto de la población implica que no es el "tipo taxonómico" ideal el que representa a la especie, sino que todos los individuos son igualmente representativos. Esto exige el uso de conceptos estadísticos en sistemática. Finalmente la biología molecular ha demostrado en forma categórica la base química de la biología. Desde el punto de vista sistemático y evolutivo, la importancia de este descubrimiento es doble. 1), que las diversas substancias químicas por sí mismas pueden proveer caracteres de uso para el sistemático, y 2), que las leyes físico-químicas determinan los límites del potencial biológico. Por estas razones la química está desempeñando un papel cada vez más importante en estudios sistemáticos.

Resumiendo lo dicho, la sistemática desde su origen ha tenido una función doble: 1), de producir orden y un método de comunicación a través de su labor de describir y clasificar e interpretar las especies biológicas, y 2), de producir una explicación científica que interprete el número de especies, sus relaciones y sus orígenes. Desde Darwin y Mendel es claro que la explicación tiene que ser en términos de la idea de la evolución y de la teoría genética moderna. Los avances de la bioquímica han demostrado por implicación que una explicación que ignora las limitaciones físico-químicas impuestas al funcionamiento de los organismos es inadecuada, de ahí la importancia cada vez mayor de los métodos químicos. Pero es la morfología, y en cierto grado la anatomía, la que aún provee el mayor número de caracteres útiles al sistemático interesado en describir y clasificar organismos, mientras que las técnicas más recientes, tales como la citología, química, y estadística, son generalmente sólo necesarias cuando se trata de interpretar el resultado de los estudios morfológicos.

En la Tabla I se pueden ver en forma resumida algunos de los usos de las técnicas modernas. En los párrafos que siguen se hará un breve resumen de su relativa importancia en estudios sistemáticos.

TABLA I

Algunos usos de las técnicas modernas en sistemática.

Genética

Herencia de caracteres (número de loci: casos de dominancia; etc.).

Fertilidad de híbridos (intra e inter-poblacionales; interespecíficos).

Citología y Citogenética

Número de cromosomas como carácter adicional de valor especial (indicador de posible esterilidad de híbridos).

Número y morfología de cromosomas como indicador de relaciones (series poliploides; aneuploides; reducción del número de cromosomas; etc.).

Análisis citológico de híbridos (apareamiento de cromosomas como índice de relaciones).

Química

Presencia de substancias químicas como carácter adicional (sobre todo productos secundarios: flavonoides, terpenos, carotenoides, etc.).

Presencia de substancias como índice de afinidad (sobre todo en híbridos).

Evolución de substancias como índice de afinidad (hemoglobinas; deshidrogenasa del ácido láctico; citocromo C: etc.).

Uso de enzimas para identificar genotipos (Taraxacum).

Estadística y Matemática

Técnicas estadísticas para mejor definir categorías taxonómicas (técnicas estadísticas clásicas).

Técnicas estadísticas para definir diferencias entre especies ("tests" de significación clásicos: t, F, análisis de variancia, etc.).

Técnicas numéricas para medir diferencias genéticas ("taxonomía numérica").

Técnicas para producir árboles filogenéticos (principio de parsimonia).

Genética: Genética es la ciencia que estudia el mecanismo de la herencia. La Genética tiene muchos aspectos tales como la *genética molecular*, que estudia los problemas de la herencia al nivel molecular y subcelular; la *genética del desarrollo*, que estudia la manera en que el código genético es transformado en un organismo; y la *genética de poblaciones*, que estudia los procesos de la herencia en grupos de organismos, poblaciones, y especies. Todas las áreas de la biología moderna tienen aspectos genéticos.

La aplicación de técnicas genéticas en estudios sistemáticos ha producido la definición biológica de la especie (Mayr) [5, 6]; el concepto moderno de la población (Wallace) [10]; los varios modelos de selección natural (Lerner) [4], y teorías sobre el origen y mantenimiento de la variabilidad en poblaciones (Wallace) [10, 11]. A pesar de ello hay aún mucho que aprender, dado que sabemos muy poco de los procesos genéticos en la mayoría de las plantas y animales. Las plantas que se conocen mejor genéticamente son las plantas domésticas, especialmente los cereales, el algodón, tabaco, tomates y papas. Este conocimiento deriva de las actividades de los fitotécnicos en tratar de producir mejores variedades. Estos estudios, a su vez, han permitido la formulación de hipótesis sobre la evolución de estas especies (Stephens [9]; Rick [7]; Hawkes) [3] y han aumentado el caudal teórico en evolución y sistemática. Estos estudios demuestran cómo un buen conocimiento de la genética de una especie permite la resolución de problemas de evolución, filogenia y clasificación. Desgraciadamente, son muy pocas las espe-

cies silvestres de las cuales se posee información de tipo genético.

Teóricamente, un conocimiento de la herencia de todos los caracteres de todos los organismos nos permitiría resolver todos los problemas sistemáticos. Efectivamente, tal conocimiento permitiría evaluar caracteres y relaciones y las barreras de incompatibilidad entre especies. Pero una tarea de esa magnitud consumiría tantas energías, y llevaría tanto tiempo, que considerando el objetivo no se justifica. Consecuentemente, técnicas genéticas se usan en aquellos casos en que las técnicas más económicas y más usuales de la taxonomía no pueden resolver el problema.

Citología y Citogenética: Las características de los cromosomas y su comportamiento durante la división celular, como también durante la formación de gametas (que son los momentos en que pueden ser teñidos y observados por medio del microscopio) han producido mucha información de valor sistemático. Tal es su importancia que hoy en día existe la *citotaxonomía*, que es una rama de la taxonomía que trata de clasificar organismos principalmente basada en sus caracteres citológicos.

La importancia de los cromosomas en estudios sistemáticos es doble: 1) su comportamiento y características pueden servir como caracteres en la clasificación de especies; y 2), los cromosomas pueden proveer información sobre los procesos genéticos y evolutivos que dieron origen a la especie. Es esta última característica la que da a la citología su lugar especial en la sistemática.

Como todas las características de un organismo, los cromosomas y los mecanismos de división celular están sujetos a la selección natural. Por lo tanto, ellos pueden diferir de especie en especie cuando estas especies han tenido historias evolutivas diversas. Como regla general, especies emparentadas muestran poca o ninguna diferencia, mientras que especies no emparentadas poseen diferencias mayores. Consecuentemente, el estudio de diferencias citológicas puede ofrecer buenos indicios para resolver las relaciones filogenéticas.

Tres características de los cromosomas son de importancia sistemática: 1), el número de cromosomas; 2), la morfología cromosómica; y 3), el comportamiento de los cromosomas durante la mitosis y especialmente en la meiosis, en forma especial el apareamiento de los cromosomas en la profase y metafase meiótica, y su separación en anafase y siguientes fases de la meiosis.

De estas características el número cromosómico es el más sencillo de obtener e interpretar; el comportamiento de los cromosomas en meiosis es el más difícil. En el pasado, las técnicas para estudiar cromosomas en plantas eran netamente superiores a las técnicas existentes para estudiar cromosomas animales, sobre todo en los vertebrados. Esta situación cambió radicalmente con la introducción de la técnica del cultivo de tejidos y el uso de colchicina y de soluciones hipotónicas. Aún así; nuestro conocimiento del número y morfología de los cromosomas de las plantas vasculares y sobre todo su comportamiento en meiosis es vastamente superior al conocimiento que poseemos sobre cromosomas de los animales vertebrados.

Sistemática bioquímica: El estudio de la totalidad de las reacciones químicas que ocurren en una célula, tejido, u organismo, es una tarea gigantesca. Sin embargo, esta tarea atrae a muchos investigadores, porque con imaginación, técnica y equipo, la complejidad de la célula puede reducirse a una serie de simples reacciones físico-químicas. Esta tarea ocupa hoy

en día a un número muy grande de biólogos, bioquímicos y biofísicos. En este momento hay más científicos que se dedican al estudio de la biología molecular (el nombre genérico que se ha dado a esta rama de la biología) que todos los sistemáticos que han existido a través del tiempo. El resultado de esta intensa labor ha producido una verdadera revolución en la biología.

Eventualmente este intenso esfuerzo dedicado a resolver los problemas bioquímicos de los organismos ha de producir un mejor entendimiento acerca de la manera en que un organismo funciona. A su vez, esto permitirá la formulación de un modelo generalizado de un organismo tipo con valor predictivo. Armado con este conocimiento, el biosistemático a su vez podrá producir un mejor modelo para explicar las reacciones entre organismos, poblaciones y especies.

Ciertas características químicas han sido usadas por sistemáticos desde hace mucho tiempo, como por ejemplo, el color de las flores o el pelaje de los animales, los olores y sabores de hojas, etc. Pero es solamente en los últimos cien años que se han tratado de identificar químicamente en forma sistemática los compuestos naturales de las plantas y los animales. La química de los compuestos naturales ha adelantado muchísimo durante el último siglo. Los principales compuestos han sido aislados y su estructura dilucidada. Muchos de estos compuestos han sido sintetizados en el laboratorio, y en muchos casos se ha estudiado su biosíntesis.

Sin embargo, la química de los productos naturales ha evolucionado más como una rama de la química que de la biología. Sólo recientemente ha habido una tendencia para utilizar los conocimientos de la química y de la bioquímica con fines sistemáticos. Los nuevos conocimientos de la biología molecular y las nuevas técnicas para aislar e identificar substancias químicas abren un campo muy fértil para el sistemático. Hoy en día es posible aislar por medio de técnicas muy sencillas, como ser la cromatografía de papel o de gas, o por medio de la electroforesis en papel o gel, toda una serie de compuestos de valor sistemático. A su vez, la presencia o ausencia de substancias específicas (sobre todo productos químicos secundarios, tales como flavonoides, terpenos, carotenes, etc.) pueden usarse como caracteres adicionales en la clasificación de organismos o en formas más nuevas. Un área donde los estudios químicos han demostrado ser muy útiles es en la identificación de híbridos naturales en plantas (Alston) [1]. Otro uso nuevo ha sido en la construcción de árboles filogenéticos empleando la información dada por la estructura física y composición química de proteínas y enzimas (Fitch y Margoliash) [2]. Finalmente el uso de proteínas para identificar genotipos en poblaciones promete abrir a la experimentación el campo de la genética de poblaciones (Solbrig) [3].

En resumen, los estudios químicos y bioquímicos que en la década entre 1950 y 1960 cambiaron la fisonomía de la biología celular y fisiológica, prometen producir grandes cambios en la sistemática, aunque posiblemente menos drásticos que los producidos en el campo de la biología molecular.

Estadística y Matemática: La sistemática de hoy en día está haciendo cada día mayor uso de técnicas y métodos matemáticos y estadísticos. Esta actividad ha sido estimulada en gran parte por la introducción de la moderna computadora electrónica. En efecto, las computadoras digitales de hoy en día pueden manipular cientos y aun miles de datos en forma rápida y eficiente. La obtención de estadísticas tan sencillas y fundamentales como es la desviación "standard" de los

grupo de organismos, aun meses de trabajo utilizando calculadoras mecánicas; hoy cualquier computadora electrónica puede resolver el problema en una fracción de segundo.

Los métodos estadísticos no son nuevos, aunque su uso en sistemática lo es. Por otro lado, el uso de técnicas matemáticas para establecer relaciones entre especies sí lo es. Los métodos son muchos y diversos y aún no se ha podido establecer matemáticamente cuál de ellos es el mejor. Aún así esa nueva metodología promete al sistemático la construcción automática de claves, la producción de descripciones de especies y, lo que es más interesante, la cuantificación de las relaciones entre especies.

Los métodos genéticos, citológicos y bioquímicos introdujeron en la sistemática una serie de nuevos caracteres para uso del sistemático. En este sentido estas técnicas representan básicamente una extensión de la sistemática clásica, en que nuevos caracteres son usados esencialmente de la misma manera que caracteres morfológicos y anatómicos. Este no es el caso con los métodos estadísticos y matemáticos. En efecto, la estadística y la matemática no introducen nuevos caracteres, sino que presentan maneras nuevas de manipular los caracteres existentes. Lo que es atrayente en estas técnicas es la precisión y exactitud que introducen, precisión y exactitud que no se pueden obtener de otra manera. Por esta razón, técnicas estadísticas y matemáticas, sin duda, van a ser de rigor en futuros estudios taxonómicos.

BIBLIOGRAFÍA

1 — Alston, R. E.: *Evol. Biol., 1:* 197-305, 1967.

2 — Fitch, W., E. Margoliash: *Science, (N.Y.), 155:* 279-284, 1966.

3 — Hawkes, J.: *"The potatoes of Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay, a biosystematic study."* Oxford University Press, Oxford, 1969.

4 — Lerner, M.: *"The genetic basis of selection."* Wiley & Co., New York, 1958.

5 — Mayr, E.: *"Animal species and evolution."* Harvard University Press, Cambridge, 1963.

6 — Mayr, E.: *"Populations, species and evolution."* Harvard University Press, Cambridge, 1970.

7 — Rick, C.: *Evolution,* (Lancaster, Pa.), *17:* 216-232, 1963.

8 — Solbrig, O. T.: *"Genotype variation within and between populations of the common dandelion, Taraxacum officinale. Wigg."* Isozyme, 1969.

9 — Stephens S. G.: *Adv. Genet., 1:* 413-442, 19 7.

10 — Wallace B.: *"Topics in population genetics."* Morton & Co., New York, 1968.

11 — Wallace B.: *"Genetic load. Its biological and conceptual aspects".* Prentice-Hall. New York, 1970.